

doi:10.3788/gzxb20184704.0423002

三级台面 InGaAs/InP 雪崩光电二极管的低边缘电场设计

朱帅宇¹, 谢生¹, 陈宇²

(1 天津大学 微电子学院 天津市成像与感知微电子技术重点实验室, 天津, 300072)

(2 中国科学院半导体研究所, 北京 100084)

摘 要:设计了一种三级台面的 InGaAs/InP 雪崩光电二极管, 解决了器件边缘电场和暗电流较高的问题, 采用 Silvaco Atlas 器件仿真软件分析了边缘间距、电荷层掺杂浓度及厚度、倍增层掺杂浓度及厚度对器件性能的影响。仿真结果表明, 本文设计的三级台面器件在边缘间距为 8 μm 时有最优器件尺寸和较低边缘电场。采用掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 、厚度为 0.2 μm 的电荷层和掺杂浓度为 $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 、厚度为 0.4 μm 的倍增层, 成功将高电场限制在中心区域, 使得反偏电压 40 V 时的边缘电场降低至 $2.6 \times 10^5 \text{V/cm}$, 仅为中心电场的 1/2, 增强了器件的抗击穿能力。此外, 本文设计的器件在 0.9 V_{br} 时的暗电流降低至 9.25 pA, 仅为传统两级台面器件的 1/3。

关键词: 镓砷; 三级台面; 雪崩光电二极管; 暗电流; 边缘电场; 贯穿电压; 击穿电压

中图分类号: TN364; TN215

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)04-0423002-7

Design of Triple-mesa InGaAs/InP Avalanche Photodiode with Low Edge Electric Field

ZHU Shuai-yu¹, XIE Sheng¹, CHEN Yu²

(1 Tianjin Key Laboratory of Imaging and Sensing Microelectronic Technology, School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2 Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100084, China)

Abstract: To eliminate the edge breakdown and reduce the dark current of conventional InGaAs/InP avalanche photodiode, a novel avalanche photodiode with triple-mesa structure was proposed. The effects of edge distance, doping concentration and thickness of charge layer and multiplication layer on the device performance were systematically investigated by a commercial simulator. The simulation results shown that the device was possessed of low edge electric field and reasonable device size, when the edge distance was 8 μm . In this design, the high electric field was confined within the center of device and the breakdown voltage was improved. The edge electric field of optimized device was only $2.6 \times 10^5 \text{V/cm}$, which was a half of central region at 40 V reverse voltage. What's more, it can reduce dark current to 9.25 pA at 0.9 V_{br} , which was only 1/3 for the dark current of traditional double-mesa avalanche photodiode.

Key words: InGaAs; Triple-mesa; Avalanche photodiode; Dark current; Edge electric field; Punch through voltage; Breakdown voltage

OCIS Codes: 230.0250; 040.1345; 040.3060; 230.5170; 250.1345

基金项目: 国家自然科学基金(No.11673019)和广西精密导航技术与应用重点实验室基金项目(No.DH201710)资助

第一作者: 朱帅宇(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 InGaAs 雪崩光电二极管设计。Email: zhushuaiyu1126@163.com

导师(通讯作者): 谢生(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为半导体器件和集成电路设计。Email: xie_sheng06@tju.edu.cn

收稿日期: 2017-11-28; 录用日期: 2018-01-09

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

单光子探测是一种重要的微弱信号检测技术,在卫星激光测距^[1]、时间相关单光子计数^[2]、量子信息技术^[3]、高分辨率光谱检测^[4]以及三维成像^[5]等领域应用广泛.随着量子保密通信技术的迅猛发展,远距离量子密钥分发技术取得重大突破,这使得工作在红外波段的单光子探测器日益受到人们的重视^[6]. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料具有电子迁移率高、与 InP 衬底晶格完全匹配等优点^[7],响应波长能够涵盖 1 310 nm 与 1 550 nm 两个通信波段.因此,研制高性能的 InGaAs/InP 雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)成为高速光子计数和单光子探测领域的研究热点之一.

目前,InGaAs/InP APD 主要有台面型和平面型两种结构.台面型器件因具有制备工艺简单、串扰小、重复性高等优点而得到了广泛应用.但是该结构存在边缘电场和表面漏电流高的问题,严重影响器件的可靠性.为解决上述问题,Mark A Itzler 等^[8]采用平面工艺设计了一种带浮动保护环的 InGaAs/InP APD,抑制了边缘击穿,降低了暗电流.然而,平面型 APD 器件的制备工艺较为复杂,且其引入的热扩散工艺容易降低器件的均匀性,限制了器件的性能.最近,Nada M 等^[9]制备了一种多级台面的 InGaAs/InAlAs APD,有效降低了边缘电场.Li Bin 等^[10]采用金属有机物化学气相沉积技术制备了不同有源区直径的三级台面 InGaAs/InAlAs APD,获得了比传统结构更低的暗电流.Chen Yihan 等^[11]制备了一种双电荷层的三级台面 InGaAs/InAlAs APD,实现了较高的探测灵敏度,可以用于 25Gb/s 的高速光信号传输系统.然而,上述研究仅采用制备与测试的方法来验证器件功能,器件结构和材料参数对器件性能如何产生影响的具体机理并未研究.

本文设计了一种三级台面 InGaAs/InP APD,采用 Silvaco Atlas 器件仿真软件分析了边缘间距、电荷层掺杂浓度及厚度、倍增层掺杂浓度及厚度对器件性能的影响,并通过调整器件结构和材料参数优化了器件的电场分布和输出特性,增强了器件的抗击穿能力,为下一步高性能 InGaAs/InP APD 的制备奠定了基础.

1 器件结构与仿真模型

本文设计的 InGaAs/InP APD 器件的剖面图如图 1,该器件采用三级台面结构,最底层为半绝缘的 InP 衬底,其上为 N 型掺杂的 InP 缓冲层及本征掺杂的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层.为了减小 InP/ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 异质界面的价带空穴势垒,在 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层和 InP 电荷层之间插入了组分渐变的 $\text{In}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{(1-y)}$ 缓冲层.N 型掺杂的 InP 电荷层上为本征掺杂的 InP 倍增层和 P 型掺杂的 InP 电场缓冲层,最后为 P^+ -InP 接触层.由半导体物理理论可知,器件两端施加反偏电压时,内建电场主要分布在空间电荷区.由于台面 Mesa1 上方没有电荷,器件边缘区域未完全耗尽,达到降低器件边缘电场的目的.

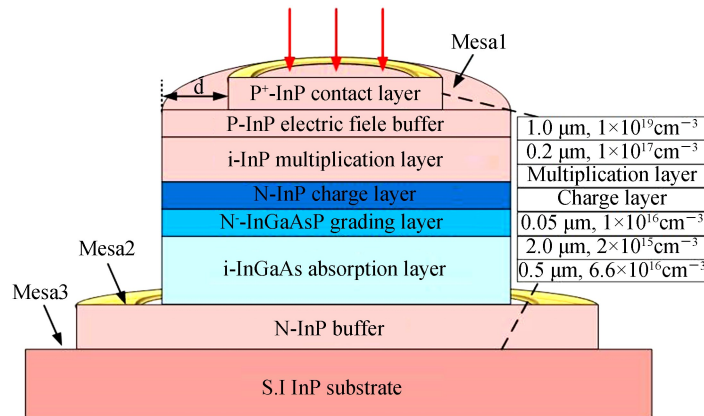


图 1 三级台面 InGaAs/InP APD 剖面图

Fig.1 Cross section of triple-mesa InGaAs/InP APD

依据图 1 所示结构,本文采用 Silvaco Atlas 器件仿真软件进行了器件建模.为了更好地模拟实际器件,仿真模型包括了漂移-扩散模型、浓度依赖迁移率模型(Concentration Dependent Mobility, CONMOB)、肖克莱复合模型(Shockley-Read-Hall Recombination, SRH)、俄歇复合模型(Auger Recombination, AUGER)、光学复合模型(Optical Radiative Recombination, OPTR)、直接隧穿模型(Band-to-Band

Tunneling, BBT)、陷阱辅助隧穿模型(Trap Assisted Tunneling, TAT)和碰撞电离模型(Impact Ionization Model, IMPACT).其中,SRH 复合模型中载流子复合速率表示为

$$R_{\text{SRH}} = \frac{N_{\text{T}}(pn - n_i^2)}{\tau_{\text{p0}}[n + n_i \exp(\frac{E_i - E_{\text{T}}}{kT})] + \tau_{\text{n0}}[p + n_i \exp(\frac{E_{\text{T}} - E_i}{kT})]} \quad (1)$$

式中, n 与 p 分别代表电子和空穴的浓度, τ_{n0} 与 τ_{p0} 是SRH复合机制下的电子和空穴寿命, n_i 与 E_i 是本征载流子浓度和本征费米能级, E_{T} 与 N_{T} 是陷阱能级和陷阱浓度.

TAT 复合模型中载流子复合速率表示为

$$R_{\text{TAT}} = \frac{N_{\text{T}}(pn - n_i^2)}{\frac{\tau_{\text{p0}}}{\Gamma_{\text{p}}^{\text{DIRAV}}}[n + n_i \exp(\frac{E_i - E_{\text{T}}}{kT})] + \frac{\tau_{\text{n0}}}{\Gamma_{\text{n}}^{\text{DIRAV}}}[p + n_i \exp(\frac{E_{\text{T}} - E_i}{kT})]} \quad (2)$$

$$\Gamma_{\text{n,p}}^{\text{DIRAC}} = \frac{\Delta E_{\text{n,p}}}{kT} \int_0^1 \exp(\frac{\Delta E_{\text{n,p}}}{kT} u - \frac{4}{3} \frac{\sqrt{2m_{\text{trap}}} (\Delta E_{\text{n,p}})^3}{3qh|E|} u^{\frac{3}{2}}) du \quad (3)$$

式中, $\Delta E_{\text{n,p}}$ 是电子和空穴的隧穿能量, q 是电荷能量, h 是普朗克常数, $|E|$ 是电场的绝对值, m_{trap} 是隧穿载流子的有效质量, u 是积分变量.

载流子碰撞电离产生率表示为

$$G = \alpha n v_n + \beta p v_p \quad (4)$$

式中, v_n 与 v_p 是电子和空穴的漂移速率, α 与 β 是电子和空穴的碰撞电离系数.仿真所用碰撞电离系数采用文献[12]所得的实验数据,其它仿真参数如表1^[13]所示.

表1 三级台面 InGaAs/InP APD 材料参数

Table 1 Material parameters of triple mesa InGaAs/InP APD

Parameter	Units	InGaAs	InP
Band gap	eV	0.78	1.34
Hole mobility	cm ² /(V·s)	450	151
Electron mobility	cm ² /(V·s)	12 000	4 730
Hole SRH lifetime	s	1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁹
Electron SRH lifetime	s	1×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁹
Hole auger coefficient	cm ⁶ /s	3.2×10 ⁻²⁸	8.7×10 ⁻³⁰
Electron auger coefficient	cm ⁶ /s	3.2×10 ⁻²⁸	3.7×10 ⁻³¹
Radiative recombination coefficient	cm ³ /s	1.43×10 ⁻¹⁰	2×10 ⁻¹¹
Effective valence band density of state	cm ⁻³	7.62×10 ¹⁸	2.03×10 ¹⁹
Effective conduction band density of state	cm ⁻³	2.75×10 ¹⁷	5.66×10 ¹⁷

2 结果与讨论

因为台面尺寸不仅影响器件性能,而且也决定器件的面积,所以本文首先分析 Mesa1 边缘间距对器件性能的影响.图2给出了边缘间距 d 分别为2 μm 、4 μm 、6 μm 、8 μm 和10 μm 时的纵向边缘电场.由图可知,随着边缘间距的增大,倍增层边缘电场由 $3.25 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 降低至 $2.6 \times 10^5 \text{ V/cm}$,吸收层边缘电场几乎为零,极大地降低了窄禁带 InGaAs 材料边缘击穿的可能性.图2中插图为倍增层电场分布图,由图可知,当间距超过4 μm 后,其对边缘电场的影响很小,边缘间距达到8 μm 后电场几乎不再继续降低.为了在获得低边缘电场的同时拥有较小的器件尺寸,下面仿真选取的边缘间距为8 μm .

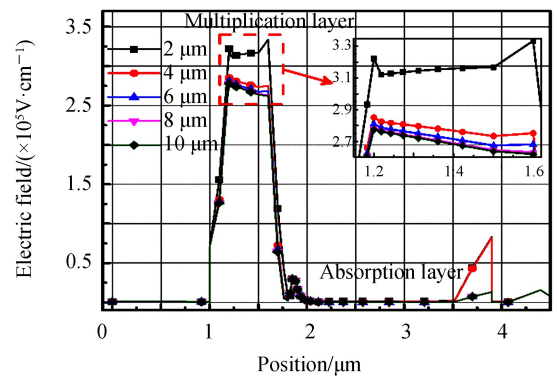


图2 纵向边缘电场

Fig.2 Edge electric field distribution in vertical

就设计吸收层、缓冲层、电荷层和倍增层分离 (Separate Absorption Grading Charge Multiplication, SAGCM) 结构的雪崩光电二极管而言, 最关键的是优化器件内部的电场分布. 一方面要使倍增层的电场强度足够大, 增加器件的碰撞电离系数; 另一方面要降低吸收层中的电场强度, 减小隧穿电流, 这就要求对器件的电荷层和倍增层进行合理设计. 文献[13]的研究表明吸收层以及衬底缓冲层对器件内部电场分布的影响较小, 本文在保持其他条件不变的情况下, 重点分析了电荷层掺杂浓度与厚度、倍增层的掺杂浓度与厚度对器件 I - V 特性和电场分布的影响. 其中, I - V 特性是在入射波长为 1 550 nm、光强为 1 mW/cm² 的条件下得到的. 击穿电压 V_{br} 是电流达到 100 μ A 时的偏置电压^[14], 贯穿电压 V_p 是吸收层和倍增层分离的 APD 所独有的, 一般指耗尽层扩展至 InGaAs 吸收层时器件的偏置电压^[15]. 此时, 吸收层中产生的光生空穴在电场的作用下进入倍增层, 不断碰撞电离生成光电流.

图 3 为不同电荷层掺杂浓度及厚度下的器件 I - V 特性和电场分布曲线. 随着电荷层掺杂浓度的增加, 贯穿电压 V_p 从 21 V 线性增大至 31 V, 击穿电压 V_{br} 从 50 V 线性减小至 36 V, 此时电荷层的厚度固定为 0.2 μ m, 如图 3(a) 所示. 随着电荷层厚度的增加, 贯穿电压 V_p 从 9 V 线性增大至 25 V, 击穿电压 V_{br} 从 72 V 线性减小至 45 V, 此时电荷层的掺杂浓度固定为 1×10^{17} cm⁻³, 如图 3(b) 所示. 为了分析贯穿电压和击穿电压变化的原因, 内插图给出了反偏电压 35 V 时器件的内建电场. 由图可知, 随着电荷层掺杂浓度及厚度的增加, 倍增层的电场强度不断增大, 这就导致其中碰撞电离系数也不断增大. 在此过程中, 倍增层的厚度没有变化, 从而在较小的偏置电压下就能引发雪崩击穿, 击穿电压减小. 与此同时, 吸收层的电场强度不断减小, 光生空穴在吸收层的漂移速率也不断减小, 因而需要增大偏置电压才能使光生空穴顺利越过势垒进入倍增层, 从而导致了贯穿电压的增大.

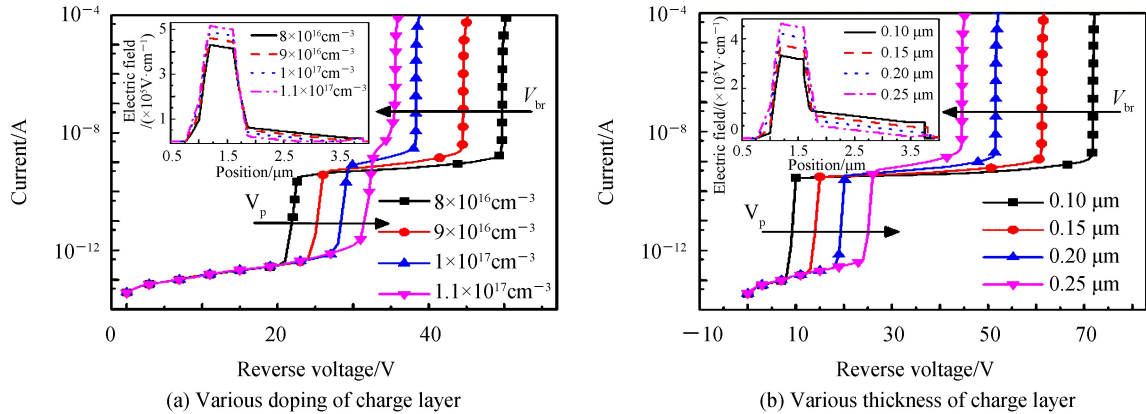


图 3 不同电荷层掺杂浓度与厚度时的 I - V 特性及内建电场

Fig.3 I - V characteristics and built in electric field with various doping and thickness of charge layer

图 4 给出了不同倍增层掺杂浓度及厚度下的器件 I - V 特性和电场分布曲线. 随着倍增层掺杂浓度的增加, 贯穿电压线性增大, 击穿电压线性减小, 此时倍增层的厚度固定为 0.4 μ m, 如图 4(a) 所示, 这与电荷层掺杂浓度的影响趋势相一致. 此外, 倍增层的掺杂浓度固定为 2×10^{15} cm⁻³ 时, 随着倍增层厚度的增加, 吸收层中电场强度不断减小, 导致贯穿电压线性增大. 随着倍增层厚度的增加, 击穿电压出现了先减小后增大的非线性变化.

为了解释击穿电压的非线性变化现象, 本文从倍增因子的角度着手分析. 三级台面 InGaAs/InP APD 的倍增因子^[16]可以表示为

$$M = \frac{1-k}{e^{-\beta(1-k)x_m} - k} \quad (5)$$

式中, k 为 InP 中的空穴和电子的碰撞电离系数比, 是一个常数; β 为空穴的碰撞电离系数, 与电场相关; x_m 是倍增层的厚度. 将倍增因子的表达式对 x_m 求偏导数可得

$$\frac{\partial M}{\partial x_m} = M^2 e^{-\beta(1-k)x_m} (\beta + x_m \frac{\partial \beta}{\partial x_m}) \quad (6)$$

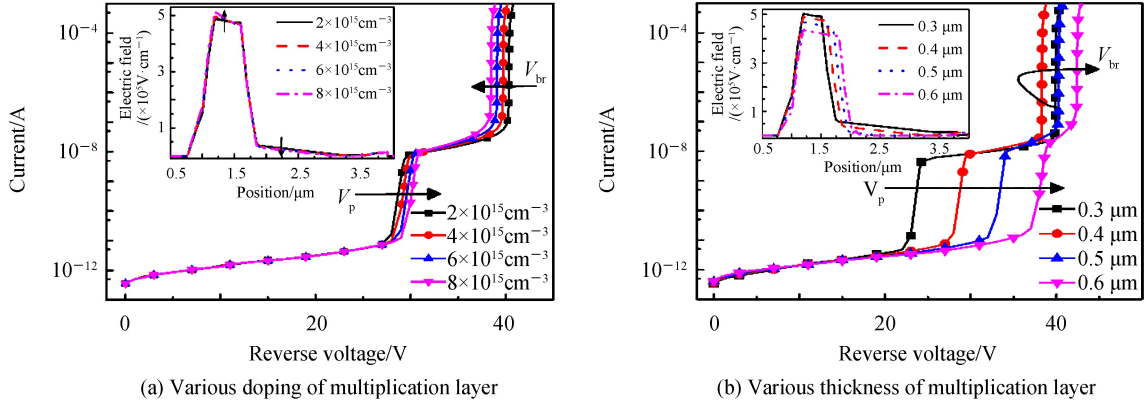

 图 4 不同倍增层掺杂浓度与厚度的 I - V 特性及内建电场

 Fig.4 I - V characteristics and built in electric field with various doping and thickness of multiplication layer

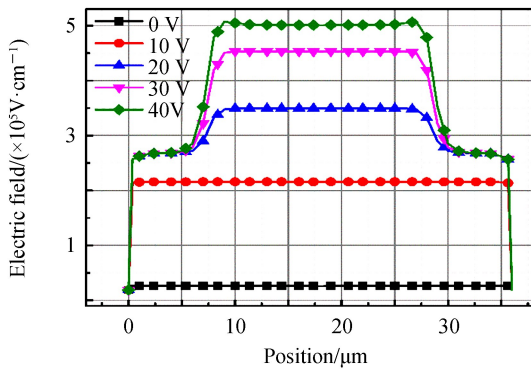
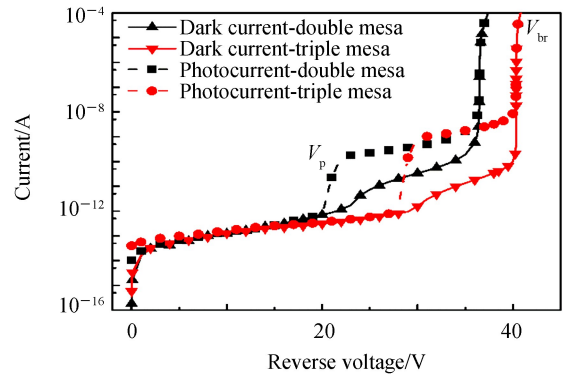
其中, $\partial\beta/\partial x_m$ 可表示为

$$\frac{\partial\beta}{\partial x_m} = \frac{\partial\beta}{\partial E_m} \cdot \frac{\partial E_m}{\partial x_m} \quad (7)$$

式中, E_m 为倍增层的最大电场强度, 场强越大, 空穴的碰撞电离系数越大, 因此 $\partial\beta/\partial E_m > 0$. 然而, 最大电场强度却随着倍增层厚度的增大而减小, 即 $\partial E_m/\partial x_m < 0$, 如图 4(b) 所示, 从而得知 $\partial\beta/\partial x_m < 0$. 然后将特征值 $-\beta/\partial\beta/\partial x_m$ 记为 x_0 , 由式(6)可知, 当倍增层的厚度 $x_m < x_0$ 时, 计算可得 $\beta + x_m(\partial\beta/\partial x_m) > 0$, 进而可知 $\partial M/\partial x_m > 0$, 此时倍增因子随倍增层厚度的增大而增大, 使得倍增层中较小的电场就会引发雪崩击穿, 故而击穿电压会减小. 当 $x_m > x_0$ 时, 计算可得 $\beta + x_m(\partial\beta/\partial x_m) < 0$, 进而可知 $\partial M/\partial x_m < 0$, 倍增因子随倍增层厚度的增大而减小, 此时只能通过增加偏置电压来增加倍增层的电场从而实现雪崩击穿, 故而击穿电压会增大. 由式(5)~(7)计算可得特征值 x_0 约为 $0.4 \mu\text{m}$, 这与图 4(b) 中击穿电压 V_{br} 先由 40 V 减小至 38 V 再增大至 43 V 的结果一致.

综上所述, 为了更好地调节器件内部的电场分布, 一方面使得倍增层电场足够大, 增加器件的碰撞电离系数, 另一方面吸收层中的电场在满足载流子漂移的情况下尽可能较小以减小隧穿电流. 对于 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料, 吸收层中的电场应当高于 $5 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 以满足载流子的正常漂移^[17]. 同时, 贯穿电压 V_p 与击穿电压 V_{br} 不可过于接近, 以免器件的线性工作区域过小. 结合图 3 和图 4 中的计算结果可知当电荷层掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、厚度为 $0.2 \mu\text{m}$, 倍增层掺杂浓度为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、厚度为 $0.4 \mu\text{m}$ 时器件性能最优, 故在以下仿真分析中选定此种材料参数的器件进一步研究.

图 5 为本文设计的三级台面 APD 在不同反偏电压下, 倍增层中心位置处的横向电场分布情况. 随着反偏电压由 0 V 增大至 40 V , 器件中心区域电场由 $2.5 \times 10^4 \text{ V/cm}$ 不断增大至 $5.0 \times 10^5 \text{ V/cm}$. 而器件边缘电


 图 5 倍增层不同反偏电压下的横向电场
 Fig.5 Horizon electric field with different voltage of multiplication layer

 图 6 两级台面与三级台面器件的 I - V 特性
 Fig.6 I - V characteristics of double-mesa and triple-mesa structure

场增大到 2.6×10^5 V/cm 后电场几乎不再随反偏电压变化,成功将高电场限制在器件的中心区域,降低了器件边缘电场.反偏电压为 40 V 时,边缘电场仅为中心电场的 1/2,这使得边缘区域的碰撞电离减小,边缘区域的碰撞电离的减小使得该区域载流子的漂移速率降低,进而降低器件暗电流.

为了验证上述推断,图 6 给出了有源区直径为 20 μm 时传统两级台面 InGaAs/InP APD 与本文设计的三级台面 APD 的光电流、暗电流特性曲线.由图可知,传统两级台面 APD 的击穿电压为 36 V,本文设计三级台面 APD 的击穿电压为 41 V,提高了器件抗击穿能力.同时,本文设计的三级台面 APD 暗电流也低至 9.25 pA($0.9V_{\text{br}}$),仅为两级台面 APD 暗电流的 1/3,与上文分析一致.

3 结论

本文设计了一种低边缘电场的三级台面 InGaAs/InP APD,采用 Atlas 器件仿真工具研究了边缘间距对边缘电场的影响,确定了 $d=8$ μm 的最优间距.此外,本文分析了电荷层掺杂浓度及厚度和倍增层掺杂浓度及厚度对器件性能的影响以及不同偏压下的横向电场.结果表明,本文设计的三级台面 APD 器件,在电荷层掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 、厚度为 0.2 μm ,倍增层掺杂浓度为 $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 、厚度为 0.4 μm 的条件下成功将高电场限制在中心区域,反偏电压 40 V 时边缘电场仅为中心电场的 1/2;在提高击穿电压的同时降低了暗电流,三级台面器件暗电流为 9.25 pA($0.9V_{\text{br}}$),仅为传统两级台面器件的 1/3.以上研究成果将有助于 InGaAs/InP APD 器件结构的设计和优化,使其能够更好地应用于光子探测、高速光信号传输等领域.

参考文献

- [1] SHI Xue-shun, LIU Chang-ming, ZHAO Kun, *et al.* Measurement system for quantum efficiency of the single photon detector based on correlated photons[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(3): 0304001.
史学舜, 刘长明, 赵坤, 等. 基于相关光子的单光子探测器量子效率测量系统[J]. 光子学报, 2017, **46**(3): 0304001.
- [2] MCCARTHY A, REN X, DELLA F A, *et al.* Kilometer-range depth imaging at 1,550 nm wavelength using an InGaAs/InP single-photon avalanche diode detector[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(19): 98-113.
- [3] LEE M H, KIM K, HA C, *et al.* Multiple InGaAs/InP single-photon avalanche detector scheme for wavelength-division-multiplexed quantum communications in a single transmission fiber[J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2017, **49**(4): 153-164.
- [4] ZENG Q Y, WANG W J, WEN J, *et al.* Dependence of dark current on carrier lifetime for InGaAs/InP avalanche photodiodes[J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2015, **47**(7):1671-1677.
- [5] ITZLER M A, PATEL K, JIANG X, *et al.* Comparison of 32×128 and 32×32 geiger-mode APD FPAs for single photon 3D LADAR imaging[C]. SPIE, 2011, **8033**(3):1-12.
- [6] LEE M H, HA C, JEONG H S, *et al.* Wavelength-division-multiplexed InGaAs/InP avalanched photodiodes for quantum key distributions[J]. *Optics Communications*, 2016, **361**:162-167.
- [7] ZHU Min, CHEN Jun, LÜ Jia-bing, *et al.* Optimization of p-i-n InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP photodetector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(1): 0104004.
朱敏, 陈俊, 吕加兵, 等. p-i-n InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 探测器结构优化[J]. 光子学报, 2016, **45**(1):0104004.
- [8] ITZLER M A, JIANG X D, ENTWISTLE M, *et al.* Advances in InGaAsP-based avalanche diode single photon detectors [J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, **58**(3-4):174-200.
- [9] NADA M, MURAMOTO Y, YOKOYAMA H, *et al.* Inverted InAlAs/InGaAs avalanche photodiode with low-high-low electric field profile[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, **51**(2):165-176.
- [10] LI Bin, LÜ Qian-qian, CUI Rong, *et al.* A low dark current mesa-type InGaAs/InAlAs avalanche photodiode[J]. *IEEE Photonic Technology Letter*, 2015, **27**(1):34-37.
- [11] CHEN Yi-han, WUN Jih-min, WU Song-lin, *et al.* Top-illuminated In_{0.52}Al_{0.48}As-based avalanche photodiode with dual charge layers for high-speed and low dark current performances[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, **24**(2):1-8.
- [12] COOK L W, BULMAN G E, STILLMAN G E. Electron and hole impact ionization coefficients in InP determined by photomultiplication measurements[J]. *Applied Physics Letters*, 1982, **40**(7):589-591.
- [13] XU Jiao, CHEN Xiao-shuang, WANG Wen-juan, *et al.* Extracting dark current components and characteristics parameters for InGaAs/InP avalanche photodiodes[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **76**:468-473.
- [14] ZHOU Peng, LIAO Chang-jun, WEI Zheng-jun, *et al.* Determination of breakdown voltage of In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP single photon avalanche diodes[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(1):21-23.

- [15] KLEINOW P, RUTZ F, AIDAM R, *et al.* Charge layer design considerations in SAGCM InGaAs/InAlAs avalanche photodiodes[J]. *Physica Status Solidi*, 2016, **213**(4):925-929.
- [16] PARK C, HYUN Y, KANG S, *et al.* Effect of multiplication layer width on breakdown voltage in InP/InGaAs avalanche photodiode[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, **67**(25):3789-3791.
- [17] ZHOU Peng. Research on InGaAs/InP single photon avalanche diode based infrared single photon detection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 53-55.
周鹏. 基于 InGaAs/InP 单光子雪崩光电二极管的红外单光子探测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 53-55.